6

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ КЛАССИФИЦИРУЮЩАЯ СИСТЕМА КАК МОДЕЛЬ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ ВЕРБАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПАМЯТИ. I

В. А. Ловицкий

В работах [1, 2] нами была предложена модель некоторых процессов переработки информации вербальной системой памяти, названная ЭВИВС, и высказано предположение о структуре ее памяти. Первый уровень памяти модели (память на буквы, буквосочетания и слова) представляет собой систему, классифицирующую слова некоторого естественного языка. Процесс классификации заключается в том, что система осуществляет распознавание сходного в различном и различного в сходном.

Цель настоящей статьи состоит, во-первых, в описании структуры первого уровня памяти, во-вторых, в рассмотрении задач, решаемых ЭВИВС на данном уровне памяти.

Введем некоторые обозначения. Пусть заданы конечные множества $\Gamma = \{a_1, a_2, \dots, a_r\}$ и $\Delta = \{1, 2, \dots, r\}$. Множество Γ назовем **алфавитом**. Каждый элемент этого множества $a_i\ (i \in \Delta)$ представляет собой **букву**. Конечную последовательность букв назовем **буквосочетанием** и обозначим $a_{i_1}^{m_1} \dots a_{i_j}^{m_j} \dots a_{i_k}^{m_k}$, где $i_j \in \Delta\ (j = 1, 2, \dots, k)$, $a_{i_j}^{m_j} = \overbrace{a_{i_j} \dots a_{i_j}}^{m_j\ \text{раз}}$, $a_{i_j} \neq a_{i\ j+1}$.

Пусть задано конечное множество буквосочетаний θ и некоторое подмножество $\Xi = \{W_1, W_2, \dots, W_q\}$ множества Θ, т. е. $\Xi \subset \Theta$. Назовем подмножество Ξ словарем. Каждый элемент этого подмножества $W_i\ (i = 1, \dots, q)$ представляет собой **слово**. Заметим, что

а) в одном и том же слове может неоднократно появляться одна и та же буква;

б) слово может состоять только из одной буквы;

в) порядок следования букв в слове строго определен;

г) для обозначения пропуска буквы в слове или буквосочетании введена «пустая» буква a_0. В ряде случаев будем использовать понятие «пустого» слова, т. е. такого, которое не содержит ни одной буквы. Для его обозначения употребляется буква e;

д) каждое слово характеризуется определенным набором признаков (начальная буква слова, вторая буква и т. д.), число которых соответствует количеству букв в слове. Каждый из признаков может принимать определенное количество значений. Например, первой буквой слова в русском языке может быть любая буква алфавита, кроме ъ, ы, ь. Различные значения одного и того же признака несовместимы, в то время как различные признаки совместимы.

Условимся слово обозначать следующим образом:

$$e \to a_{i_1}(1) \to \dots — a_{i_j}(x) \to \dots \to a_{i_k}(l) \to e, \qquad (1)$$

где $a_{i_j}(x)$ ($i_j \in \Delta$, $j = 1, 2, \ldots k$, $x = 1, 2, \ldots, l$) представляет собой значение признака x. Символ «$\rightarrow$» читается «за... следует...». Буквы $a_{i_1}(1)$ и $a_{i_k}(l)$ обозначают границы слова и говорят о том, что букве $a_{i_1}(1)$ предшествует, а за буквой $a_{i_k}(l)$ следует пустое слово e. Величина l определяет длину слова, т. е. количество букв, из которых это слово составлено.

Предлагаемая модель имеет два входа и один выход. На первый вход подаются слова в алфавите Г. Каждому из этих слов определенный оператор ставит в соответствие одно и только одно выходное слово в том же алфавите Г. Такой оператор будем называть однозначным и замкнутым в алфавите Г. В работе [3] показано, что любой оператор, сопоставляющий каждой букве l-буквенного входного слова m_i ($i = 1, 2, \ldots, l$) или m букв выходного слова, можно представить в виде сложного оператора, состоящего из $M \left(M = \prod_{i=1}^{l} m_i\right)$ или M_c ($M_c = m^l$) однозначных операторов Q_j ($j = 1, 2, \ldots, M$), воздействующих на одно и то же l-буквенное входное слово. Очевидно, что $M = M_c$ при $m_i = m$.

Будем считать, что все M операторов воплощены в одной и той же модели. Другими словами, модель обладает M способами поведения и имеет переключатель, позволяющий выбирать тот или иной оператор. Выбор оператора происходит или по воле экспериментатора, или под действием какого-либо внешнего фактора.

Индекс при Q или любой другой символ, значение которого определяет выбор оператора в каждом конкретном случае, будем называть параметром. Значение параметра подается на второй вход модели и определяет однозначный замкнутый оператор, обращающий входное слово в выходное. В дальнейшем будем считать (если не оговорено противное), что значение параметра, подаваемое на второй вход модели, определяется экспериментатором.

В связи с тем, что слово или буквосочетание поступает на первый вход модели последовательно, признак за признаком, классифицирующую систему, воспринимающую эти входные сигналы, будем называть последовательной классифицирующей системой (ПКС). Память ПКС представлена первым уровнем памяти модели. Каждому значению каждого признака в памяти ПКС соответствует т. н. распознающий элемент (РЭ), возбуждающийся под действием значения того или иного признака. Представим РЭ в виде элемента, имеющего два входа и три выхода. В дальнейшем, если не будет оговорено конкретно, о каком входе или выходе идет речь, будем иметь в виду только первый вход и первый выход РЭ. Распознающий элемент может находиться в «возбужденном» или «невозбужденном» состоянии в зависимости от того, появляется или не появляется сигнал на любом из его выходов при подаче входного сигнала на один из входов РЭ. Входы и выходы РЭ будем называть соответственно входными и выходными связями.

Перед тем как перейти к рассмотрению свойств РЭ, условимся использовать при их описании язык исчисления предикатов с целью уточнения записи этих свойств. Примем в качестве формальных эквивалентов пропозициональных связок: «не», «или», «и», «если... , то...» соответственно символы отрицания ($\neg$), дизъюнкции ($\vee$), конъюнкции ($\wedge$) и импликации ($\Rightarrow$). Круглыми скобками обозначим порядок действия перечисленных связок.

Для образования формул будем пользоваться следующими правилами:

1) Если x, $a_i(x)$, РЭ$_j(x)$, V_k, W_i — переменные, то $B(a_i(x)$, РЭ$_j(x))$, $C($РЭ$_i(x))$, $D($РЭ$_{j_1}(x)$ РЭ$_{j_2}(x+1))$, $F(a_{i_1}(x)$, $a_{i_2}(x+1))$, $G($РЭ$_j(x))$,

$H(\text{РЭ}_j(x))$, $J(W_{i_1}, W_{i_2})$, $K(W_{i_1}, W_{i_2})$, $L(V_k)$, $Q(\text{РЭ}_j(x))$, $R(\text{РЭ}_j(x))$, $S(\text{РЭ}_j(x))$, $T(x, l)$ — формулы.

2) Любое выражение, построенное рекуррентно из уже имеющихся формул по правилам: $(\neg B(a_i(x), \text{РЭ}_j(x)))$, $(R(\text{РЭ}_j(x)) \vee S(\text{РЭ}_j(x)))$, $(R(\text{РЭ}_j(x)) \wedge G(\text{РЭ}_j(x)))$, $(B(a_i(x), \text{РЭ}_j(x)) \Rightarrow C(\text{РЭ}_j(x)))$ — есть формула.

3) Если $\text{РЭ}_j(x)$ — переменная, а $R(\text{РЭ}_j(x))$ — формула, то $\forall \text{РЭ}_j(x) \times \times R(\text{РЭ}_j(x))$, $\exists \text{РЭ}_j(x) R(\text{РЭ}_j(x))$, $\exists! \text{РЭ}_j(x) R(\text{РЭ}_j(x))$ — формулы.

4) Никаких формул, кроме получающихся согласно 1—3, нет [4, § 31].

Пусть распознающие элементы обладают следующими свойствами.

Свойство 1. Существует одно и только одно значение признака, которое может возбудить $\text{РЭ}_j(x)$, т. е. $\exists! a_i(x) \exists! \text{РЭ}_j(x) B(a_i(x), \text{РЭ}_j(x))$, где $\exists! a_i(x)$ представляет собой квантор единственности, а $a_i(x)$ и $\text{РЭ}_j(x)$ обозначают переменные, на которые действует указанный квантор. $B(a_i(x), \text{РЭ}_j(x))$ — это двухместный предикат, истинный тогда и только тогда, когда буква $a_i(x)$ возбуждает $\text{РЭ}_j(x)$. Обозначение $\text{РЭ}_j(x)$ говорит о том, что j-й распознающий элемент возбуждается значением a_i признака x. При возбуждении $\text{РЭ}_j(x)$ буквой $a_i(x)$ на первый выход проходят буквы, непосредственно следующие за буквой, возбудившей $\text{РЭ}_j(x)$, а на третьем выходе элемента появляется значение a_i признака x.

Свойство $\text{РЭ}_j(x)$ распознавать только единственное значение a_i признака x приобретается им в процессе обучения. До обучения, т. е. до первого поступления на его вход какой-либо буквы, РЭ_j находится в безразличном состоянии. Это означает, что при подаче на вход элемента значения $a_i (a_i \in \Gamma, i \in \Delta)$ признака x РЭ_j запоминает его и в дальнейшем возбуждается только при поступлении на его вход буквы $a_i(x)$.

Свойство 2. Каждый $\text{РЭ}_j(x)$ обладает свойством возбуждаться при подаче на его второй и только второй вход буквы $\alpha (\alpha \in \Gamma)$, т. е. $\forall \text{РЭ}_j(x) R(\text{РЭ}_j(x))$, где $R(\text{РЭ}_j(x)$ — одноместный предикат, истинный тогда и только тогда, когда $\text{РЭ}_j(x)$ возбуждается буквой α. При возбуждении $\text{РЭ}_j(x)$ буквой α на выход 1 проходят буквы, поданные на вход 1, а на выход 3 — значение признака, которое хранится в $\text{РЭ}_j(x)$. Заметим, что выходы 3 всех распознающих элементов соединены с выходом модели.

Свойство 3. Каждому $\text{РЭ}_j(x)$ приписывается целое неотрицательное число P, называемое в е с о м. Величина определяется числом возбуждений $\text{РЭ}_j(x)$ с момента поступления на его вход первой возбудившей этот $\text{РЭ}_j(x)$ буквы и характеризует его «опыт». Изменение величины P происходит только при возбуждении соответствующего $\text{РЭ}_j(x)$. Обозначим вес $\text{РЭ}_j(x)$ после n-го возбуждения через $P_n(\text{РЭ}_j(x))$. Тогда закон изменения веса $\text{РЭ}_j(x)$ задается следующим соотношением, определенным для всех значений $n = 0, 1, 2, \ldots$:

$$P_{n+1}(\text{РЭ}_j(x)) = P_n(\text{РЭ}_j(x)) + \lambda, \tag{2}$$

где $P_0(\text{РЭ}_j(x)) = 0$, а λ — коэффициент, отражающий «эмоциальное состояние» модели. В дальнейшем (если не оговорено противное) будем считать, что $\lambda = 1$. Указанное свойство можно представить в виде

$$\exists! a_i(x) \exists! \text{РЭ}_j(x) B(a_i(x), \text{РЭ}_j(x)) \vee \exists! \text{РЭ}_j(x) R(\text{РЭ}_j(x)) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \exists! \text{РЭ}_j(x) C(\text{РЭ}_j(x)),$$

где $C(\text{РЭ}_j(x))$ — одноместный предикат, истинный тогда и только тогда когда $P_{n+1}(\text{РЭ}_j(x)) := P_n(\text{РЭ}_j(x)) + \lambda$. Символ «:=» читается: «принимает значение» или «становится равным».

Свойство 4. Введем понятие подчинения для РЭ.

О п р е д е л е н и е 1. *Будем говорить, что РЭ_j подчинен РЭ_i, если он связан с РЭ_i его выходной связью.*

Введем двухместный предикат $D(\text{РЭ}_i, \text{РЭ}_j)$, истинный тогда и только тогда, когда РЭ_i подчиняет РЭ_j. Распознающие элементы соединяются между собой по правилу: один выход РЭ_i может быть соединен с несколькими входами РЭ_j, но каждый вход РЭ_i соединен не более чем с одним выходом РЭ_i. Это ограничение, наложенное на соединяющие связи, можно представить себе яснее, если потребовать, чтобы из выхода каждого РЭ_i выходила и к каждому входу РЭ_j подходила в точности одна связь, причем по пути связи могут разветвляться, но не могут сливаться.

Свойство 5. Пусть на вход РЭ_{j_1} подано слово $e \to a_{i_1}(1) \to a_{i_2}(2) \to a_{i_3}(3) \to e$. РЭ_{j_1} может возбудиться только первой буквой входного слова. Если $\exists! a_{i_1}(1)\, \exists! \text{РЭ}_{j_1}(1)\, B(a_{i_1}(1), \text{РЭ}_{j_1}(1))$, то на выход 1 $\text{РЭ}_{j_1}(1)$ проходят буквы, следующие за $a_{i_1}(1)$, т. е. $e \to a_{i_2}(2) \to a_{i_3}(3) \to e$, а на выход 3 — значение признака, которое хранится в $\text{РЭ}_{j_1}(1)$. Если $\exists! \text{РЭ}_{j_1}(1)\, \forall \text{РЭ}_{j_2}(2)\, D(\text{РЭ}_{j_1}(1), \text{РЭ}_{j_2}(2))$, то $\exists! a_{i_2}(2)\, \exists! \text{РЭ}_{j_2}(2)\, B(a_{j_2}(2), \text{РЭ}_{j_2}(2))$. Введение двухместного предиката $F(a_{i_1}(x), a_{i_2}(x+1))$, истинного тогда и только тогда, когда $a_{i_1}(x) \to a_{i_2}(x+1)$, позволяет представить указанное свойство в следующем виде:

$$\exists! a_{i_1}(x)\, \exists! \text{РЭ}_{j_1}(x)\, B(a_{i_1}(x), \text{РЭ}_{j_1}(x)) \wedge \exists! a_{i_1}(x)\, \exists! a_{i_2}(x+1)\, F(a_{i_1}(x),$$
$$a_i\ (x+1)) \wedge (\exists! \text{РЭ}_{j_1}(x)\, \forall \text{РЭ}_{j_2}(x+1)\, D(\text{РЭ}_{j_1}(x), \text{РЭ}_{j_2}(x+1)) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \exists! a_{i_2}(x+1)\, \exists! \text{РЭ}_{j_2}(x+1)\, B(a_{i_2}(x+1), \text{РЭ}_{j_2}(x+1))).$$

В приведенной формуле с целью упрощения записи часть скобок опущена. Принимается, что при отсутствии скобок порядок применения связок определяется последовательностью $\neg$ (отрицание), $\wedge$ (конъюнкция), $\vee$ (дизъюнкция), $\Rightarrow$ (импликация) и $\sim$ (эквивалентность), а для одноименных связок — порядком их появления в формуле, читаемой слева направо.

Свойство 6. Для различения конечных букв слова вводится признак конечной буквы $v(\text{РЭ}_{j_1}(x))$, который может принимать два значения — b_0 или b_1. Значение b_0 признака $v(\text{РЭ}_{j_1}(x))$ означает, что буква $a_{i_1}(x)$ не является конечной буквой слова, а значение b_1 того же признака говорит о том, что $a_{i_1}(x)$ представляет собой конечную букву. Учитывая все сказанное, данное свойство представим в виде

$$\exists! a_{i_1}(x)\, F(a_{i_1}(x), e) \wedge \exists! a_{i_1}(x)\, \exists! \text{РЭ}_{j_1}(x)\, B(a_{i_1}(x),$$
$$\text{РЭ}_{j_1}(x)) \wedge \exists \text{РЭ}_{j_1}(x) \neg G(\text{РЭ}_{j_1}(x)) \Rightarrow \exists! \text{РЭ}_{j_1}(x)\, H(\text{РЭ}_{j_1}(x)),$$

где $H(\text{РЭ}_{j_1}(x))$ — одноместный предикат, истинный тогда и только тогда, когда $v(\text{РЭ}_{j_1}(x)) := b_1$, а $G(\text{РЭ}_{j_1}(x))$ — одноместный предикат, истинный тогда и только тогда, когда $v(\text{РЭ}_{j_1}(x)) = b_1$. Значение признака $v(\text{РЭ}_{j_1}(x))$ до присвоения ему значения b_1 равно b_0.

Свойство 7. $\forall \text{РЭ}_{j_1}(x)\, Q(\text{РЭ}_{j_1}(x))$, где $Q(\text{РЭ}_{j_1}(x))$ — одноместный предикат, истинный тогда и только тогда, когда на вход $\text{РЭ}_{j_1}(x)$ поступает буква a_0, на выходе 2 появляется сигнал, равный $P(\text{РЭ}_{j_1}(x))$. Выходной сигнал поступает в так называемый блок управления распознающими элементами (БУРЭ). Если в БУРЭ поступили сигналы от нескольких распознающих элементов, то, во-первых, блок управления производит сравнение поступивших весов и выделяет $\text{РЭ}_{j_1}(x)$, которому соответствует максимальный вес; на второй вход выделенного $\text{РЭ}_{j_1}(x)$ БУРЭ подает букву α, т. е.

$\forall \text{РЭ}_{j_1}(x)\, Q(\text{РЭ}_{j_1}(x)) \Rightarrow \exists! \text{РЭ}_{j_1}(x)\, R(\text{РЭ}_{j_1}(x))$, во-вторых, из БУРЭ на выход модели поступает сигнал, обозначающий отношение веса элемента, на второй вход которого из блока управления была подана буква α, к сумме всех весов, поступивших в БУРЭ от h распознающих элементов в результате подачи на их первые входы буквы a_0. Иными словами, величина, поступающая из БУРЭ на выход модели, может быть представлена в виде

$$p(\text{РЭ}_{j_1}(x)) = \frac{P(\text{РЭ}_{j_1}(x))}{\sum\limits_{j_1=1}^{h} P(\text{РЭ}_{j_1}(x))}.$$

Свойство 8. При подаче на вход РЭ_{j_1} слова e возбуждения РЭ_{j_1} не происходит, т. е. $\forall\,\text{РЭ}_{j_1} \neg B(e, \text{РЭ}_{j_1})$, и поэтому

$$\exists!a_{i_1}(x)\,F(a_{i_1}(x), e) \wedge \exists!a_{i_1}(x)\,\exists!\text{РЭ}_{j_1}(x)\,B(a_{i_1}(x), \text{РЭ}_{j_1}(x)) \wedge$$
$$\wedge\,\exists!\text{РЭ}_{j_1}(x)\,\forall\,\text{РЭ}_{j_2}(x+1)\,D(\text{РЭ}_{j_1}(x), \text{РЭ}_{j_2}(x+1)) \Rightarrow \forall\,\text{РЭ}_{j_2}(x+1) \neg$$
$$\neg B(e, \text{РЭ}_{j_2}(x+1)).$$

Формула $\forall\,\text{РЭ}_{j_2}(x+1) \neg B(e, \text{РЭ}_{j_2}(x+1))$ обозначает, что прекращается распространение возбуждения на элементы, подчиненные $\text{РЭ}_{j_1}(x)$.

Свойство 9. Если $\exists!\text{РЭ}_{j_1}(x)\,R(\text{РЭ}_{j_1}(x)) \wedge \exists\text{РЭ}_{j_1}(x)\,G(\text{РЭ}_{j_1}(x))$, то на выходе $\text{РЭ}_{j_1}(x)$, удовлетворяющего этому условию, появляется слово e. Более полно данное свойство может быть записано следующим образом:

$$\exists!\text{РЭ}_{j_1}(x)\,R(\text{РЭ}_{j_1}(x)) \wedge \exists\,\text{РЭ}_{j_1}(x)\,G(\text{РЭ}_{j_1}(x)) \wedge \exists!\text{РЭ}_{j_1}(x)\,\forall\,\text{РЭ}_{j_2}(x+$$
$$+1)\,D(\text{РЭ}_{j_1}(x), \text{РЭ}_{j_2}(x+1)) \Rightarrow \forall\,\text{РЭ}_{j_2}(x+1) \neg B(e, \text{РЭ}_{j_2}(x+1)).$$

Свойство 10. Если на вход 2 $\text{РЭ}_j(x)$ подаются последовательно буквы β и α, т. е. $\beta \to \alpha$ $(\alpha, \beta \in \Gamma)$, то даже при выполнении условия, что $\exists!\text{РЭ}_j(x)\,R(\text{РЭ}_j(x)) \wedge \exists\text{РЭ}_j(x)\,G(\text{РЭ}_j(x))$, на выходе $\text{РЭ}_j(x)$ слово e не появится. Заметим, что при поступлении на второй вход $\text{РЭ}_j(x)$ только буквы β на выходах 1, 2 и 3 никакие сигналы не появляются, т. е. будем говорить, что $\text{РЭ}_j(x)$ не реагирует на букву β.

Введение одноместного предиката $S(\text{РЭ}_j(x))$, истинного тогда и только тогда, когда на второй вход $\text{РЭ}_j(x)$ подана буква β, позволяет записать

$$\forall\,\text{РЭ}_{j_1}(x)\,Q(\text{РЭ}_{j_1}(x)) \wedge \exists\,!\text{РЭ}_{j_1}(x)\,\forall\,\text{РЭ}_{j_2}(x+1)\,D(\text{РЭ}_{j_1}(x), \text{РЭ}_{j_2}(x+1)) \wedge$$
$$\wedge\,F(a_0(x), a_0(x+1)) \wedge \forall\,\text{РЭ}_{j_1}(x)\,S(\text{РЭ}_{j_1}(x)) \Rightarrow (\exists!\text{РЭ}_{j_1}(x)\,R(\text{РЭ}_{j_1}(x)) \wedge$$
$$\wedge\,\exists\text{РЭ}_{j_1}(x)\,G(\text{РЭ}_{j_1}(x)) \Rightarrow \forall\text{РЭ}_{j_2}(x+1)\,Q(\text{РЭ}_{j_2}(x+1))).$$

Пусть задано конечное множество распознающих элементов $Z = \{\text{РЭ}_1, \text{РЭ}_2, \ldots, \text{РЭ}_s\}$. Каждый элемент этого множества удовлетворяет всем 10 рассмотренным свойствам. В дальнейшем речь будет идти о таких и только таких РЭ, которые удовлетворяют условию, что $\text{РЭ}_i \in Z$ $(i = 1, \ldots, s)$.

Если на первый вход модели подавать множество обучающих последовательностей, а на второй вход сигнал, который может быть записан в виде предложения: «запоминать предъявляемые модели обучающие последовательности», то в процессе обучения РЭ_i $(i = 1, 2, \ldots, s)$, которые до этого момента были не связаны между собой и находились в безразличном состоянии, будут объединяться в структуры (свойства 4 и 5). Совокупность полученных в результате обучения структур и будет представлять собой память ПКС. Остановимся на требованиях, предъявляемых к обучающим последовательностям.

Требование 1. *Обучающие последовательности, подаваемые на первый вход модели, должны представлять собой слова и только слова.*

Заметим, что говорить о памяти той или иной системы имеет смысл в том и только в том случае, если внешняя среда (в нашем случае — последовательности слов) устроена так, что будущее повторяет прошло

Иными словами, если модель обучена словам W_i ($W_i \in \Xi$), то для того, чтобы при функционировании она могла использовать свою память, необходимо на вход этой модели также подавать слова W_j ($W_j \in \Xi$). Так как слово представляет собой последовательность букв (1), каждая из которых возбуждает один и только один РЭ$_i$ ($i = 1, 2, \ldots, s$), то для возбуждения входным словом целой структуры необходимо, чтобы эта структура отражала порядок следования букв входного слова.

Для определения второго требования, предъявляемого обучающим последовательностям, нужно ввести понятие включения одного слова в другое и понятие пересечения двух слов.

Определение 2. *Пусть W_i и W_j — два произвольных слова. Будем говорить, что слово W_i включает слово W_j, если слово W_i может быть представлено в виде $W_i = V_1 W_j V_2$, где V_1 и V_2 — некоторые буквосочетания, быть может, равные пустому слову e.* В дальнейшем, говоря о включении одного слова в другое, будем иметь в виду случай, когда $V_1 = e$, т. е. $W_i = W_j V_2$. Включение W_j в W_i обозначим через $W_i \mapsto W_j$, где символ «$\mapsto$» читается как «включает».

Определение 3. *Будем говорить, что слова W_i и W_j пересекаются, если существует такое непустое буквосочетание V, возможно, состоящее и из одной буквы, что $W_i \mapsto V$ и $W_j \mapsto V$.* Буквосочетание называется непустым, если оно не равно пустому слову e. Пересечение слов W_i и W_j обозначим через $W_i \cap W_j$. Очевидно, что $W_i \cap W_j = W_j \cap W_i$.

Определение 4. *Пусть V_1 и V_2 — такие два буквосочетания, что $V_1, V_2 \in \Theta$. Допускается, чтобы каждое из V_1 и V_2 состояло из одной буквы. Будем говорить, что $V_1 = V_2$, если $V_1 \mapsto V_2$ и $V_2 \mapsto V_1$.*

Введем двухместный предикат $T(V_1, V_2)$, истинный тогда и только тогда, когда $V_1 = V_2$.

Требование 2. $\forall W_i \exists W_j J(W_i, W_j)$, где $J(W_i, W_j)$ — двухместный предикат, истинный тогда и только тогда, когда $W_i \cap W_j$. Для обучающих последовательностей слов допускается включение одного слова в другое, т. е. $\exists W_i \exists W_j K(W_i, W_j)$, где $K(W_i, W_j)$ — двухместный предикат, истинный тогда и только тогда, когда $W_i \mapsto W_j$.

В дальнейшем, говоря об обучающих последовательностях слов, будем иметь в виду, что каждое слово этих последовательностей удовлетворяет обоим требованиям.

Рассмотрим процесс формирования структуры памяти ПКС. Пусть на первый вход модели подано l-буквенное слово. Первая буква этого слова $a_{i_1}(1)$ поступает на вход случайно выбранного РЭ$_{j_1}$ (РЭ$_j \in Z$, $j_1 = 1, 2, \ldots, s$), находящегося в безразличном состоянии, и возбуждает его. Заметим, что вероятность всех РЭ$_{j_1}$ (РЭ$_{j_1} \in Z$, $j_1 = 1, 2, \ldots, s$), находящихся в безразличном состоянии, возбудиться буквой $a_{i_1}(x)$ ($x = 1, 2, \ldots, l$) одинакова. На выход РЭ$_{j_1}$ проходят оставшиеся $l - 1$ буква входного слова (свойство 5). Затем опять производится случайная выборка РЭ$_{j_2}$ и его возбуждение первой буквой из оставшихся $l - 1$ букв входного слова, т. е. буквой $a_{i_2}(2)$, и т. д. Наконец, РЭ$_{j_l}$ возбуждается буквой $a_{i_k}(l)$. Так как за буквой $a_{i_k}(l)$ следует пустое слово, то дальнейшего подчинения элементов РЭ$_{j_{l+1}}$ элементу РЭ$_{j_l}$ не происходит (свойство 8), и первая буква нового слова, следующего за e, возбудит новый элемент РЭ$_{j_{l+1}}$, выбранный случайным образом из РЭ, находящихся в безразличном состоянии, при условии, что $a_{i_1}(1) \neq a_{i_v}(1)$. В противном случае буква $a_{i_v}(1)$ при $v = 1$ возбудит элемент РЭ$_{j_1}$. Дальнейшее формирование структуры памяти ПКС происходит аналогичным образом.

Полученную в результате обучения словам W_i ($W_i \in$ E, $i = 1, \ldots, q$) структуру памяти ПКС удобно описать в терминах древовидных структур, но т. к. в литературе не существует единой терминологии для описания дерева, начнем с определений, частично используя при этом терминологическую систему Айверсона [5].

Основной элемент дерева — РЭ. Связь между подчиняющим РЭ$_i$ и подчиненным ему РЭ$_j$ называется ветвью от РЭ$_i$ к РЭ$_j$. Путь — это последовательность ветвей, в которой конечный элемент одной ветви совпадает с начальным элементом следующей. РЭ$_j$ считается доступным из РЭ$_i$, если существует путь от РЭ$_i$ к РЭ$_j$. Число ветвей составляет длину пути. Заметим, что слово длиной l образует путь длиной $l - 1$.

При соблюдении требования 2 пути должны пересекаться между собой. В результате пересечения образуются узлы. РЭ$_i$ назовем узлом при условии, что от него отходит не менее двух ветвей. Если РЭ$_j$ не подчинен ни одному из РЭ$_i$, то РЭ$_j$ будем называть начальным элементом дерева. Элементы, находящиеся на одинаковых расстояниях от начального элемента, составляют слой дерева. Число слоев дерева определяется длиной наибольшего пути. РЭ$_i$, которые не подчиняют ни одного элемента, называются конечными. Контуром называется путь, в котором начальный элемент совпадает с конечным.

Определение 5. *Будем говорить, что структура имеет вид дерева, если 1) она не содержит контуров; 2) содержит по крайней мере один узел; 3) каждый элемент структуры подчинен не более чем одному элементу.*

Начальные элементы древовидной структуры объединяются в первый слой памяти ПКС. Первые входные связи всех начальных элементов связаны с первым входом модели. Совокупность древовидных структур, полученная в результате объединения их начальных элементов, в дальнейшем будем называть сложной древовидной структурой.

Если $\exists!\,\text{РЭ}_{j_1}(1)\ \forall\,\text{РЭ}_{j_2}(2)\ D(\text{РЭ}_{j_1}(1),\ \text{РЭ}_{j_2}(2))$, то $\text{РЭ}_{j_2}(2)$ образуют второй слой памяти ПКС. В общем случае, если $\exists!\,\text{РЭ}_{j_1}(x)\ \forall\,\text{РЭ}_{j_2}(x+1)\ D(\text{РЭ}_{j_1}(x)),\ \text{РЭ}_{j_2}(x+1))$, то $\text{РЭ}_{j_2}(x+1)$ образуют $(x+1)$-й слой памяти ПКС.

На основании изложенного можно сформулировать следующую теорему.

Теорема. *Распознающие элементы в результате обучения образуют сложную древовидную структуру, если и только если они обладают свойствами 1, 4 и 5, а для входных сигналов выполняется требование 2.*

Доказательство. Из описания процесса обучения становится очевидным, что для образования последовательности распознающих элементов длиной l, каждый элемент которой возбуждается соответствующей буквой обучающего l-буквенного слова, необходимо, чтобы распознающие элементы обладали свойствами 1, 4 и 5. Соблюдение же требования 2 приводит к тому, что полученные последовательности элементов будут содержать узлы.

Докажем, что свойства 1, 4 и 5 и требование 2 являются независимыми, т. е. несоблюдение любого из указанных свойств или требования 2 приводит к тому, что структура памяти ПКС, полученная в результате обучения, не будет иметь вид дерева.

Предположим, что не выполняется первое свойство, т. е. РЭ$_j$ может быть возбужден любой буквой a_i ($a_i \in \Gamma$). В этом случае структура памяти ПКС будет иметь вид цепи, т. е. такой структуры, в которой от каждого элемента отходит не более одной ветви. Если же не выполняется правило соединения РЭ$_i$ между собой (свойство 4), т. е. распознающие элементы могут быть соединены своими входными связями с выходными связями нескольких $РЭ_j$ (что возможно только при разветвлении входной связи), то получим ассоциативную сеть [6]. Несоблюдение свойства 5 приведет к тому, что в результате обучения будет получено не дерево, а r не связанных между собой элементов. И, наконец, при невыполнении требования 2 структура памяти будет представлять собой r непересекающихся цепей. Таким образом, независимость каждого из свойств 1, 4 и 5 и требования 2 доказана.

Из данной теоремы вытекает следующее следствие.

Следствие. *Если распознающие элементы обладают свойствами 1, 5 и их входные связи могут разветвляться, а для входных сигналов выполняется требование 2, то в результате обучения из распознающих элементов образуется ассоциативная сеть.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, В. А. Ловицкий. Моделирование словесного поведения в эксперименте с воспроизведением предложений. Тезисы докладов на третьем съезде общества психологов СССР, т. 1, М., 1968.

2. Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, В. А. Ловицкий. Структурная модель вербальной системы памяти. Тезисы докладов на третьем съезде общества психологов СССР, т. 1, М., 1968.

3. В. А. Ловицкий. Об эвристическом подходе к моделированию вербальной системы памяти. Сб. «Некоторые проблемы биокибернетики, применение электроники в биологии и медицине», изд. ИК АН УССР, вып. 1, К., 1969.

4. С. Клини. Введение в математику. Изд-во иностр. лит., 1957.

5. К. Jverson. A programming language. Willey and sons. N.-Y., 1962.

6. Э. Т. Голованъ, С. Я. Заславский. Информационная модель памяти человека. Ж. «Кибернетика», 1967, № 3.